

I-A35

引張軟化特性を考慮したコンクリート構造でのき裂進展解析

建設技術研究所 ○正会員 伊藤恭平
三井造船 久保博司
岡山大学大学院工学研究科 学生会員 大杉敏之
東京工業大学工学部 正会員 廣瀬壮一
岡山大学環境理工学部 正会員 谷口健男

1. はじめに

構造設計において、構造物の最終的な耐力の算定が必要不可欠であり、そのためには構造物を破壊に至らしめる要因の一つであるき裂進展挙動の解明が必要である。本研究では解析対象としてコンクリートを取り上げ、離散ひびわれモデルを採用し有限要素法を用いて2次元混合モード下でき裂進展解析を行う。また、き裂先端部での力学挙動の非線形性を考慮し、き裂進展経路や荷重-変位関係について実験結果との比較を行う。

2. 非線形理論の定式化

本研究では、コンクリートのき裂先端部に発生するマイクロクラック生成以降の引張軟化特性のモデルに結合力モデルを用いる。これは、図-1に示すように、開口変位の関数で与えられる結合力が作用していると考えられるので、開口変位-結合応力関係を図-1の右図のような引張軟化特性として与え、その曲線下の面積が破壊エネルギー G_F であるというものである。本研究では、引張軟化曲線を簡便にした直線モデルと二直線モデルを用いている。

コンクリート材料のき裂先端は骨材によるブリッジングや微小き裂の発生によって応力の特異性は無く、 $K_I = 0$ の状態にあると考えられる。したがって、本解析では、き裂先端での応力の特異性をなくすため、開口型応力拡大係数 $K_I = 0$ という条件を採用している。

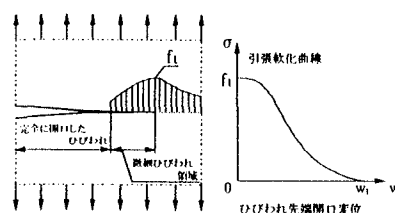


図-1 結合力モデルと引張軟化曲線

き裂進展方向の決定については、応力拡大係数 $K_{II} = 0$ となる角度を探し、その角度をき裂進展角度とする。なお、き裂進展長については、き裂が滑らかに進展していくように適切に設定する。この方法を用いると、一回き裂を進展させるのに複数回の解析が必要であることと、ひびわれモデルに離散ひびわれを用いていることから解析に膨大な時間を要するが、研究室自主開発による自動要素分割プログラム¹⁾を用いて、要素分割をできるだけ簡略化することで、この解析システムを成立させている。

3. 有限要素解析

通常、力学問題を有限要素法で解析する場合には荷重制御や変位制御などの手法が用いられるが、本研究では、これらの手法は用いることは出来ない、なぜなら、初期状態で荷重点での変位、荷重の大きさはともに未知となっており、いかに示す特別な計算方法が必要となる。

有限要素法による剛性マトリックスを $[K]$ とすると、節点変位 $\{u\}$ と節点力 $\{f\}$ の間には、式(1)の関係を得ることができる。本解析モデルに作用する節点力である荷重、き裂表面の結合力、支点反力を P 、 F 、 R と表し、それぞれの節点力に対応する節点変位を u^P 、 u^F 、 u^R とし、境界条件($u^R = 0$)を考慮すると、式(1)は式(2)のように書ける。

$$[K]\{u\} = \{f\} \quad (1)$$

$$[\bar{K}] \begin{Bmatrix} u^P \\ u^F \\ R \\ u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P \\ F \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式(2)の両辺に逆行列 $[\bar{K}]^{-1}$ を掛けると、式(3)を得る。式(3)より、荷重 P と結合力 F を求めれば各節点変位ならびに反力を得ることができる。荷重 P と結合力 F は以下のようにして求めた。

結合力 F は引張軟化曲線によって開口変位の非線形な関数として与えられる。よって、結合力 F を求めるには繰り返し計算を必要とする。こ

$$\begin{Bmatrix} u^P \\ u^F \\ R \\ u \end{Bmatrix} = [\bar{K}]^{-1} \begin{Bmatrix} P \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + [\bar{K}]^{-1} \begin{Bmatrix} 0 \\ F \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Keyword ; き裂進展解析、き裂進展角度、有限要素法、結合力モデル、離散ひびわれ

〒540-0008 大阪府大阪市中央区大手前 1-2-15 TEL(06)(6944)7852 FAX(06)(6944)7892
〒700-8530 岡山県岡山市津島中 2-1-1 環境理工学部 TEL(086)251-8167 FAX(086)251-8257
〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 工学部 TEL(03)5734-2692 FAX(03)5734-3578

ここでは、第一ステップにおいて適当な結合力 F を初期条件として与え、得られた開口変位より引張軟化曲線を用いて結合力を求め、それを次のステップの既知の結合力とする。

荷重 P はき裂先端での応力拡大係数 K_I がゼロという条件から求める。き裂先端に、特異アイソパラメトリック要素を用いた時、応力拡大係数 K_I とき裂先端近傍のき裂法線方向節点変位には式(4)の関係がある。

$$K_I = \sqrt{\frac{2\pi}{L}} \frac{G}{\kappa + 1} \left[4(u^F(a) - u^F(a')) + u^F(b') - u^F(b) \right] \quad (4)$$

ここで、平面ひずみについて $\kappa = 3 - 4\nu$ 、平面応力について $\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$ 、 ν ：ポアソン比、 G ：せん断弾性係数、 L 特異要素長、 $u^F(a)$ は節点 a でのき裂法線方向変位である。

式(3)より u^F は P の関数として表されるので、それを式(4) = 0 に代入することにより、 P を求められる。得られた P 、 F を式(3)に代入すれば節点変位が得られる。以上のステップを、荷重 P の値が収束するまで繰り返す。なお、実際の計算では、 $[K]^{-1}$ を、直接計算することなくコレスキー分解を用いて計算量の節約を図る。

4. 解析結果

社団法人日本コンクリート工学協会による共通解析問題「アンカーボルトの引き抜き破壊の実験及び解析問題」を対象に非線形き裂進展解析を行った。図-2 に解析モデルを、図-3、4 に解析結果と比較のための実験結果²⁾を示す。なお、材料定数については、破壊エネルギー $G_F = 100(Nm/m^2)$ 、引張強度 $f_t = 3.0(MPa)$ 、弾性定数 $E_c = 30.0(GPa)$ 、ポアソン比 $\nu = 0.2$ を用いる。この解析モデルは左右対称な形状と境界条件を持つことから左半分のみを対象とし、平面応力状態として解析を行った。数値解析から得られた、最大荷重値は $44.5kN$ 、その時の変位は $0.1mm$ で、ともに実験値と類似した値が出ている。また、き裂進展経路においても実験結果のパターンと類似した経路をたどっており、破壊に至るまでの挙動をうまく表現できているといえる。

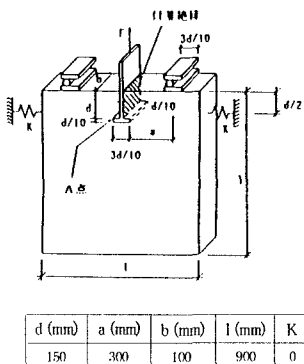


図-2 解析モデルと寸法

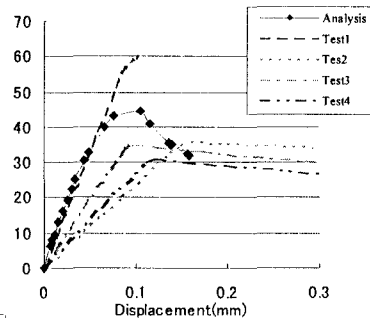


図-3 荷重-変位曲線

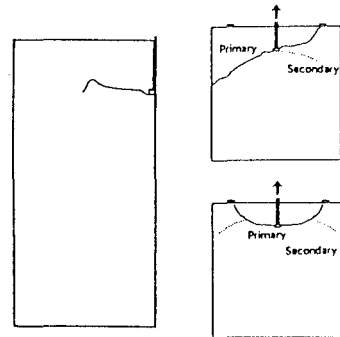


図-4 き裂進展経路(左:解析結果、右:実験結果)

5. 結論

本解析では、非線形き裂進展解析を行うために、き裂先端での非線形性の取り入れとき裂進展角度の決定法について新たな提案を行い、その手法を用いてコンクリート構造でのき裂進展挙動の解析を行った。結果より、き裂先端部での応力の特異性はうまく除去され、また、き裂進展方向についても実験結果を良く再現できていると考える。問題としてき裂進展方向の決定法の改善（特に演算時間の短縮）が残されている。

参考文献

- 1) 谷口健男、太田親：複数き裂の進展解析用要素自動分割法シミュレーション、Vol. 9-3, pp. 16-21.
- 2) 社団法人 日本コンクリート工学協会：破壊力学の応用研究委員会報告、1993
- 3) 松永昭吾、廣瀬壮一、谷口健男、伊藤恭平：アンカーボルトの引抜きによるコンクリート構造体でのひび割れ伝播解析、構造工学論文集、Vol. 40A, 1994, pp511-517